

# 量子スピン液体における半整数熱量子ホール効果 ——マヨラナ・フェルミオンと非可換エニオン

笠原 裕一 〈京都大学大学院理学研究科 ykasahara@scphys.kyoto-u.ac.jp〉

水上 雄太 〈東京大学大学院新領域創成科学研究科 mizukami@edu.k.u-tokyo.ac.jp〉

芝内 孝禎 〈東京大学大学院新領域創成科学研究科 shibauchi@k.u-tokyo.ac.jp〉

松田 祐司 〈京都大学大学院理学研究科 matsuda@scphys.kyoto-u.ac.jp〉

電子は電荷  $-e$  とスピン  $1/2$  を持ち、フェルミ統計に従う素粒子である。マクロな数の電子の集団が示す劇的な現象に、磁場中の2次元電子ガスで観測される整数および分数量子ホール効果がある。前者は電子状態のトポロジという基本的な概念を生み出した。後者では電子間の多体効果により分数電荷の粒子やフェルミ統計ともボース統計とも異なる分数統計に従う粒子、エニオンなどの奇妙な準粒子が現れる。

近年、量子スピン液体と呼ばれる状態を持つ絶縁体が注目を集めている。量子スピン液体では、量子ゆらぎの効果のために絶対零度までスピンは凍結しない。このスピン系においてキタエフ模型と呼ばれる興味深い量子多体模型が提案されている。スピン  $1/2$  が2次元ハニカム格子を形成し、キタエフ相互作用と呼ばれるボンドに依存したイジング型の交換相互作用が存在したとき、基底状態は厳密解を持った非磁性の量子スピン液体状態となるというものである。この量子スピン液体では、一個の局在スピンの量子力学的多体効果により他のスピンと強くエンタングルした結果、二種類のマヨラナ・フェルミオンが低エネルギー素励起に現れる。

最近の研究で、ハニカム格子2次元磁性体  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  は、キタエフ相互作用を持ち磁場中で量子スピン液体の基底状態を持つ候補物質であることが明らかになってきた。我々は  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  の熱ホール効果を測定し、熱ホール伝導度が磁場に対して一定値（プラトー）をとり、その値が電子系の量子ホール効果状態で観測される値の半分の値

に量子化されていることを示した。絶縁体スピン系における半整数熱量子ホール効果の観測は、系がトポロジにより保護された状態にあり、通常のフェルミオンの半分の自由度を持つ中性の粒子、すなわちマヨラナ・フェルミオンが存在していることの決定的証拠となる。

電子系の量子ホール効果では、電流および熱流は試料の端に形成されるエッジ状態の1次元伝導チャンネルによって運ばれる。エッジ流は、整数量子ホール効果では電子流であり、分数量子ホール効果では電子相関によって分数に量子化されたホール流である。これに対し半整数熱量子ホール効果状態では、遍歴するマヨラナ・フェルミオンのエッジ流により熱が運ばれる。つまりエッジ流が分数量子ホール効果では電荷の分割（分数電荷）に深く関係しているのに対し、半整数熱量子ホール効果ではスピンの分割（マヨラナ・フェルミオン）に由来している。さらに  $\alpha$ - $\text{RuCl}_3$  では、高磁場で量子化は消失し、熱ホール伝導度は急速にゼロになる。これはマヨラナ・エッジモードを持つ状態と持たない状態の間のトポロジカル量子相転移の可能性を示唆している。

半整数熱量子ホール効果は、試料のエッジから離れたバルクの状態において、非可換エニオンとよばれる特異な統計性を持つ準粒子の存在も示している。この準粒子は、量子情報を安定した形で保つことができると考えられているため、将来のトポロジカル量子コンピューターへの応用の可能性が注目されている。

## —Keywords—

### マヨラナ・フェルミオン：

電氣的に中性で、自分自身がその反粒子であるフェルミ粒子。1937年にイタリアの物理学者 Ettore Majorana (エットーレ・マヨラナ) によって理論的に提唱された。

### 熱ホール効果：

金属や半導体中の電子は磁場下でローレンツ力を受けて軌道が曲げられ、電流と垂直方向に電圧が、熱流と垂直方向に温度勾配が生じる。前者を電気ホール効果、後者を熱ホール効果と呼ぶ。電気の流れない絶縁体では電気ホール効果は生じないが、電荷を持たない粒子が熱を運び、熱ホール効果を示すことがある。

### エニオン：

2つの粒子を交換すると系の波動関数  $\Psi$  は、ボゾンの場合  $\Psi$  に、フェルミオンの場合  $-\Psi$  に変換されるが、多粒子で構成される系では、これらの統計に従わない素励起が現れ、このような創発準粒子をエニオンと呼ぶ。エニオンには、粒子交換により  $e^{i\theta}\Psi$  と位相  $\theta (\neq n\pi)$  がつく「可換エニオン」と、行列  $U$  を用いて  $U\Psi$  のように変換される「非可換エニオン」という二種類の統計性が異なるものが存在する。非可換エニオンは、量子情報を保持し処理できる粒子として期待されている。通常の奇数分母の分数量子ホール効果におけるラフリン状態での準粒子は可換エニオンである。マヨラナ・ゼロモードは非可換エニオンの例となっている。